中重型商用车锻造轴颈断裂原因分析及改进措施

何铭雪 王向朋 张婉庭 吴宁 韩长亮 邹德志

(一汽解放汽车股份有限公司商用车开发院,长春 130011)

摘要: 针对某中重型商用车锻造轴颈断裂问题,依据锻造轴颈断口宏观及微观形貌分析,确定了锻造轴颈裂纹源位于轴颈心部,裂纹由内向外扩展,为淬火工艺过程中出现的热应力型开裂,且原材料的成分偏析对轴颈开裂有一定促进作用。通过对轴颈部位进行工艺调整,先加工内孔再进行调质处理,降低了由于轴颈截面尺寸过大引起淬火热应力开裂的风险,同时消除了轴颈心部成分偏析对开裂的影响。生产工艺的优化降低了产生淬火裂纹的风险、提升了产品可靠性。

关键词: 锻造轴颈 断裂 淬火裂纹 热应力

中图分类号: U465 **文献标志码:** B **DOI:** 10.19710/J.cnki.1003-8817.20250334

Fracture Cause Analysis and Improvement Measures of the Heavy Vehicle Forged Journal

He Mingxue, Wang Xiangpeng, Zhang Wanting, Wu Ning, Han Changliang, Zou Dezhi

(Commercial Vehicle Development Institute, FAW Jiefang Truck Co., Ltd., Changchun 130011)

Abstract: To address the forged jourral fracfure of a mcdium-and-heary-duty vehicle, by analyzing the macro and micro morphology of the fracture of the forged journal, it is determined that the source of the crack is located in the center of the neck journal, and the crack spreads from inside to outside. It is judged that the crack is the thermal stress type cracking appearing in the quenching process, and the component segregation of raw materials also plays a certain role in promoting the cracking of the neck journal. The risk of quenching thermal stress cracking caused by excessive neck journal section size is reduced by the process adjustment of the neck position of the forged journal shaft: interior hole first and then tempering treatment, and the influence of the segregation of the core components of the neck journal on cracking is eliminated at the same time. By optimizing and adjusting the production process of forged journal, the risk of quenching crack is reduced and the reliability of the product is improved.

Key words: Forged journal, Fracture, Hardening crack, Thermal stress

1 前言

汽车锻造轴颈作为车辆关键零部件,在车辆行驶过程中起到转向和承载的作用,同时需承担地面冲击和在车轮侧滑、转向、制动等过程中产生的负荷,复杂的使用工况要求锻造轴颈具有较高的强度和冲击韧性[1]。汽车锻造轴颈与汽车悬架、前车轴、转向系统以及制动器总成相连,具有承载汽车前部载荷、支撑并带动前轮绕主销转动以及实现汽车灵活转向和正常行驶的作用[2]。锻造轴颈若发生断裂可能会引发严重的事故。因此,对锻造轴颈断裂展开失效分析具有重要意义[3]。如某车型在生产线装配过程中出现一例转向节断裂案例,通过分析认为,零件化学成分中Si含量过高是导致脆性断裂的主要原因[4]。某公司使用40Cr圆钢生产转向节,在锻造过程中出现的裂纹缺陷,

作者简介: 何铭雪(1997—),女,工程师,学士学位,研究方向为金属材料应用及开发。

参考文献引用格式:

何铭雪, 王向朋, 张婉庭, 等. 中重型车锻造轴颈断裂原因分析及改进措施[J]. 汽车工艺与材料, 2026(9): 30-35.

HE M X, WANG X P, ZHANG W T, et al. Fracture Cause Analysis and Improvement Measures of the Heavy Vehicle Forged Journal[J]. Automobile Technology & Material, 2026(9): 30-35.

通过分析结果表明,裂纹区域存在显著的低C高Mn异质,零件成分显著偏差。追溯生产工艺,推测该异常源于原料预处理过程中混入的杂质。就此提出改进意见:在生产过程中严格进行质量检测[5]。

本文拟通过对锻造轴颈断口宏观及微观形貌分析,确定锻造轴颈裂纹源,并通过对锻造轴颈轴颈部位进行工艺调整,降低淬火裂纹产生风险、提升产品可靠性。

2　问题描述

某中重型车生产线在锻造轴颈安装时,先后发生2起锻造轴颈断裂现象,编号分别为1#、2#。锻造轴颈断裂位置一致,均为轴颈部位距离端面约93~98 mm处,如图1所示。

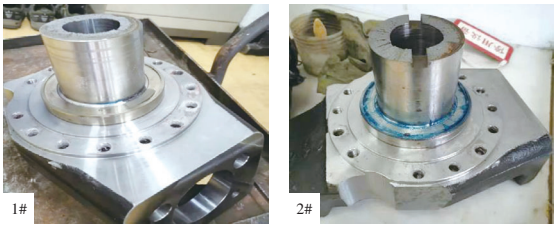


图1　1#、2#断裂锻造轴颈宏观形貌

2个锻造轴颈的断裂均发生在头部锁紧螺母的拧紧过程中,经校核,拧紧机精度满足装配要求,在之后的生产过程中又出现一次半成品锻造轴颈断裂,该锻造轴颈编号为3#,如图2所示,断裂发生于调质处理后、车轴颈内孔前,断裂位置与成品件断裂位置相同,断口位于距离端面约97 mm。

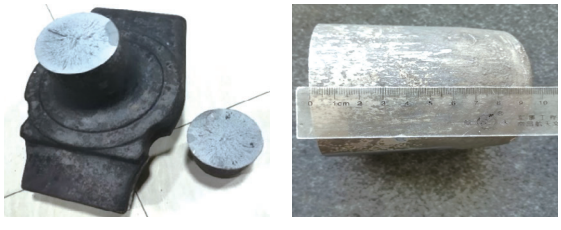


图2　3#半成品断裂锻造轴颈宏观形貌

该锻造轴颈的材料为40Cr,主要制造工艺为:下料、锻造、调质、机械加工(轴颈车内孔、车平面、拉花键)、局部感应淬火、磨削轴颈,其中锻造始锻温度控制在1 150~1 200 ℃。力学性能要求为:调质硬度254~287 HBW2.5/187.5/20,感应淬火区表面硬度52~58 HRC,有效硬化层(450 HV5)深度3.0~6.0 mm。

3　试验过程与结果

3.1　宏观观察

如图3所示,1#、2#锻造轴颈裂纹并未沿轴颈台肩扩展,距离台肩部位3~5 mm。如图4所示,2件锻造轴颈断口表面靠近外表面的局部均有锈蚀现象,由于锻造轴颈断裂后即发现锈蚀,断口并没有在空气中暴露过长时间,所以锈蚀应该发生在锻造轴颈完全断裂前;根据锻造轴颈断口形貌分析,其断裂性质为一次性脆性断裂,裂纹由轴颈内表面向外表面扩展。

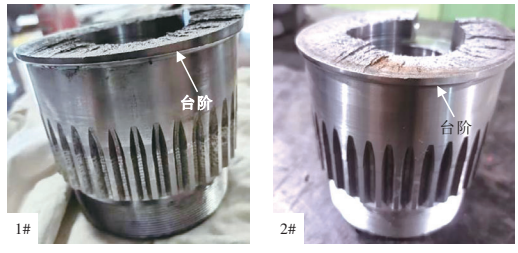


图3　1#、2#锻造轴颈断裂位置

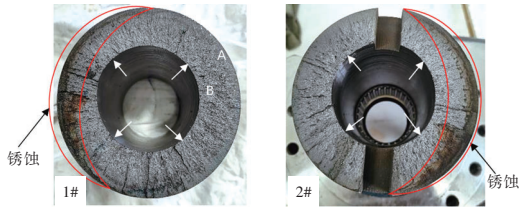


图4　1#、2#锻造轴颈断口形貌

3#断裂锻造轴颈的断口形貌如图5所示,裂纹由心部向表面扩展,断裂性质同样为一次性脆性断裂,裂纹源位于心部C位置,裂纹源部位呈劈柴状形貌。

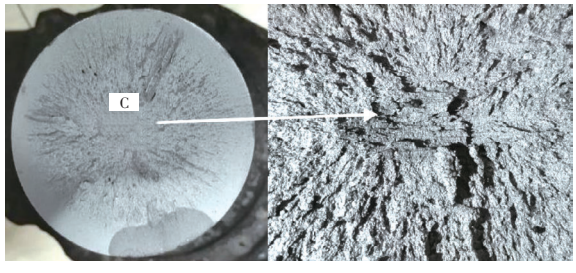
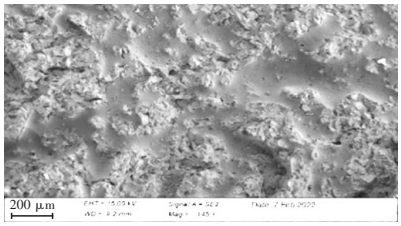


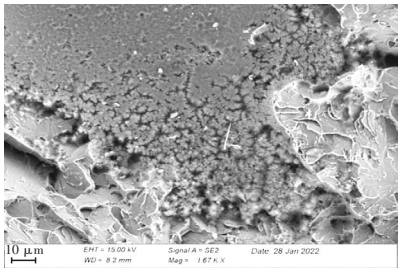
图5　3#锻造轴颈断口形貌

3.2　微观观察

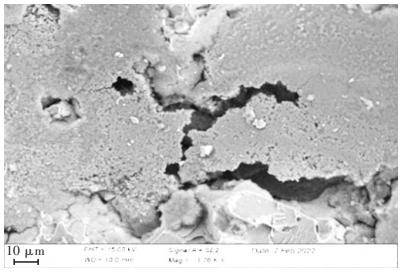
通过蔡司Sigma500扫描电镜对断裂的成品锻造轴颈进行断口微观分析,锻造轴颈锈蚀部位扫描电镜下的微观形貌见图5,断口表面被氧化物覆盖,如图6a~图6c所示,放大后发现氧化膜边缘部位呈枝晶状长大,如图6d所示。



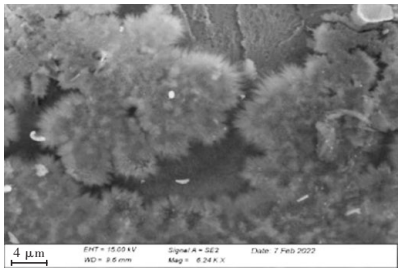
(a)断口表面形貌(145×)



(b)断口表面形貌(1 670×)



(c)断口表面形貌(1 760×)



(d)断口表面局部放大

图6 断口锈蚀形貌

如图7所示,利用牛津能谱仪Xplore30对锈蚀产物进行分析,除零件自身元素成分外,还含有氧、铝、钙及卤素成分。

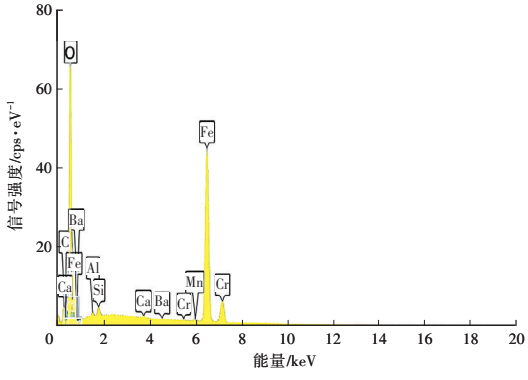


图7 锈蚀产物能谱分析结果

对现生产成品件的断口未锈蚀部位进行微观形貌分析,靠近外表面(图4中A部位)的微观开裂机制以图8所示沿晶加韧窝为主,裂纹扩展区(图4中B部位)的微观开裂机制为图9所示解理断裂;对半成品断裂件的断口微观形貌进行分析,靠近表面位置与裂纹扩展区域的开裂机制与成品件相同,其心部(图5中C部位)的开裂机制为沿晶加解理,晶粒间伴有次生裂纹,如图10所示。

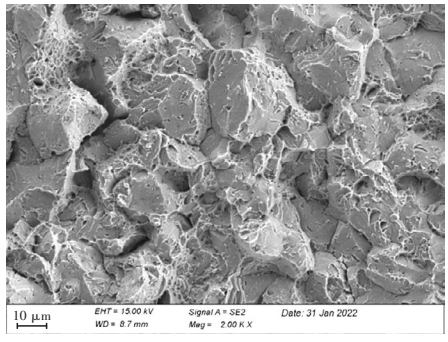


图8 断口边缘微观形貌

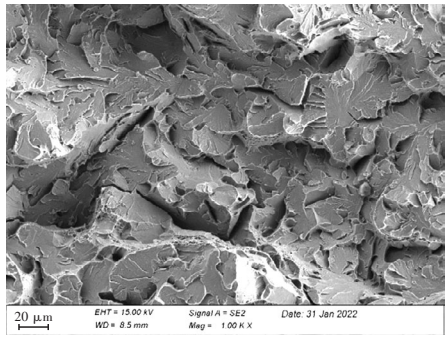


图9 裂纹扩展区微观形貌

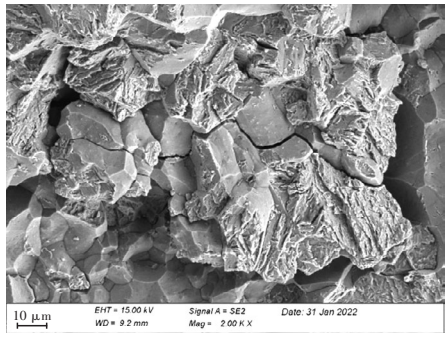


图10 心部微观形貌

3.3 金相组织检验

利用奥林巴斯DSX1000金相显微镜对断裂锻造轴颈的金相组织进行检验分析。装配断裂的锻造轴颈取2#件进行金相组织检验分析,图11所示断口边缘金相组织为回火索氏体加少量铁素体;图12所示断口扩展区金相组织为贝氏体加珠光体

加铁素体;3#断裂锻造轴颈边缘及扩展区金相组织与2#件相同,心部(裂纹源部位)金相组织为珠光体加马氏体加铁素体,如图13、图14所示,可以看到在裂纹源断面及靠近裂纹源部位均有马氏体组织存在,并且马氏体部位小载荷维氏硬度为570~580 HV5。

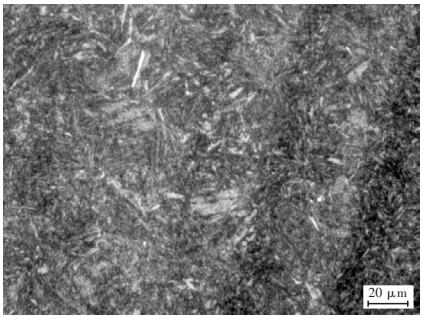


图11　断口边缘金相组织

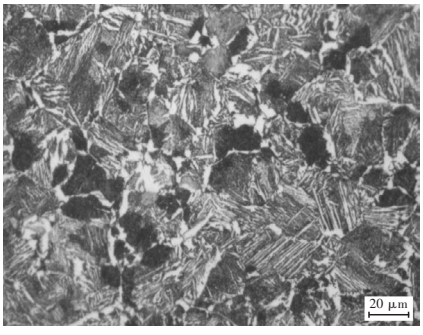


图12　断口扩展区金相组织

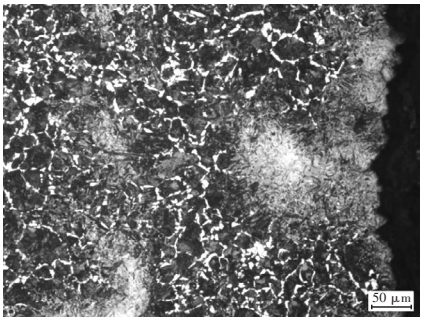


图13　裂纹源断面金相组织

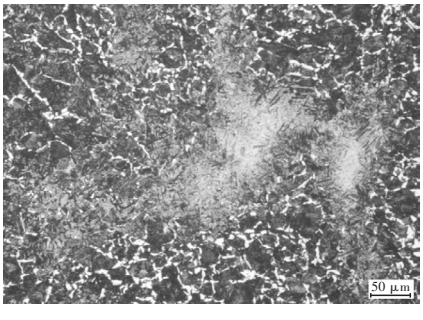


图14　靠近裂纹源部位金相组织

3.4　力学性能检验

利用耐博THR-150DX洛氏硬度计及耐博THBS-3000MDX布氏硬度计对断裂锻造轴颈进行力学性能检验,检验部位及检验结果如表1所示。2#锻造轴颈表面经过感应淬火处理,其有效硬化层深符合图纸要求,由于3#未经感应淬火处理,没有有效淬硬层深,而2#、3#件裂纹扩展区硬度均低于图纸要求。

表1　硬度检验结果

检验项目	表面(A)硬度	扩展区(B)硬度/HBW	心部(C)硬度/HBW	有效淬硬层深(450 HV5)/mm
2#件检验结果	54.5 HRC、54.8 HRC、55.3 HRC	245、247、251		3.2
3#件检验结果	266 HBW、269 HBW、273 HBW	242、247、249	240、242、245	

3.5　元素含量检验

利用日立FMP2直读光谱仪对锻造轴颈元素含量进行检验,检验结果如表2所示。2#、3#锻造轴颈的元素含量均符合图纸的40Cr材料要求。

表2　化学成分检验结果(质量分数)　%

元素	C	S	P	Mn	Si	Cr	Mo
2#件	0.39	0.022	0.010	0.75	0.24	0.99	0.008
3#件	0.41	0.015	0.002	0.78	0.22	0.97	0.02

4　问题分析

4.1　断口氧化原因分析

2件成品锻造轴颈的断口均存在腐蚀现象,并且由腐蚀物微观形貌及能谱分析结果判定应为氧化腐蚀,考虑到锻造轴颈在制造过程中轴颈表面有磨削加工过程,由于成品锻造轴颈原始裂纹的存在,磨削过程中冷却介质进入引起断口表面氧化腐蚀。

4.2　断口微观形貌分析

半成品锻造轴颈的心部裂纹源部位微观开裂机制为沿晶加解理性质,并伴有次生裂纹,金相组织中除珠光体加铁素体外,还存在大量的团装马氏体组织,马氏体硬度达到570~580 HV5。由于锻造轴颈断裂部位直径100 mm,40Cr材料在淬火时

很难淬透，心部存在马氏体说明合金元素含量高，存在合金元素偏析的现象。

该锻造轴颈在锻造时首先将直径160 mm原材料镦粗到200 mm，再通过2次锻挤挤出轴颈部分，而断裂部位距离轴颈端面93~98 mm，约为镦粗后坯料直径的1/2，原材料棒料心部是成分偏析最严重的部位，经过锻打后原材料的心部被挤压到锻造轴颈开裂部位，形成横向密集的锻造流线。

4.3 断裂机理分析

金属零件淬火裂纹是由淬火引起的组织应力或热应力大于金属材料的脆性强度引起的。

组织应力产生于金属零件淬火冷却过程中，因表层和心部的马氏体相变不同时进行，金属零件冷却后期，当心部温度降至上马氏体点、将发生马氏体相变而体积膨胀时，受到已转变为高强度马氏体表层的阻碍，从而在心部产生压应力，表层产生拉应力。组织应力的大小与材料在马氏体相变温度范围的温差有关，截面温差越大、相变时体积膨胀量及膨胀速率越大，组织应力也越大。

热应力是由表层和心部温差引起金属零件的体积收缩不均匀而产生的内应力。在不考虑相变的情况下，金属零件冷却后期，表面已降至室温，心部继续降温和体积收缩，而表层则阻碍心部收缩，从而在心部产生拉应力，表层产生压应力。钢的冷却速度越快、淬火加热温度越高、金属零件截面尺寸越大、钢的导热性越差、截面温差越大，越易增大热应力[6]。

淬火应力类型通常分为组织应力型、热应力型及过渡型。

该断裂的锻造轴颈属于大型非淬透类零件，该类零件淬火后获得热应力型残余应力，并且淬硬层的厚度与零件的截面尺寸之比很小，这类零件的开裂原因和裂纹类型，都是由最大拉应力移至截面中心或其附近的热应力型残余应力所致[7]。该锻造轴颈为横断型淬火裂纹，裂纹源位于轴颈心部，并向外表面扩展，符合热应力型残余应力引起开裂的特征。

4.4 验证性试验

取一个与断裂锻造轴颈同批次淬火后的锻造轴颈毛坯，在距离轴颈端头100 mm处横向切断，将断面在机床上磨削平整后，再将断面在细砂纸磨抛，发现断面靠近心部附近*A*、*B*区域没有磨抛到，如图15所示，验证了横向切开后轴颈心部依然受拉应力作用收缩凹陷，从而说明断裂的锻造轴颈开裂是由于受到热应力型应力作用引起的。

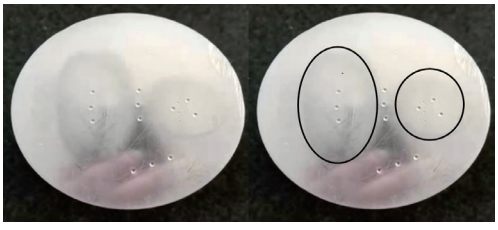


图15 轴颈断面心部凹陷

4.5 改进措施

通过分析开裂锻造轴颈断口的宏观及微观形貌、原材料性能，提出改进措施如下：

a. 由于在锻造轴颈心部区域存在团状马氏体，特别是断口附近马氏体数量尤其多，说明该锻造轴颈原材料存在成分偏析的现象，心部碳含量及合金元素含量高，在淬火工艺过程中局部形成马氏体。基于以上，建议锻造轴颈制造商控制原材料进厂质量，关注材料心部偏析，选择更优质的原材料供应商。

b. 由于金属零件截面尺寸越大在淬火过程中越容易产生热应力型开裂，建议更改生产工序，在毛坯锻造成形后，将轴颈加工内孔工序调整到锻造工序后、调质工序前，这样在淬火时，轴颈部位为空心管状结构，管壁尺寸较更改工序前的实心轴大幅减薄，避免了淬火过程出现热应力过大引起开裂的风险。

c. 经过对锻造轴颈原材料成分偏析的控制及生产工艺的优化调整，后期生产的200件锻造轴颈没有再出现淬火开裂的问题。

5 结束语

经对开裂锻造轴颈断口的宏观及微观分析，判断该断裂锻造轴颈在装车前已存在原始裂纹，由断口特征分析，该锻造轴颈断裂性质为一次性脆性开裂，裂纹由心部向表面扩展。

综合考虑锻造轴颈的尺寸结构、断裂部位、生产制造工艺以及金相组织等因素，分析认为该锻造轴颈开裂符合淬火冷却过程的热应力型开裂特

征。

生产锻造轴颈的原材料心部存在严重成分偏析,造成淬火后锻造轴颈心部局部存在马氏体组织,在淬火冷却过程受到热应力作用时更容易引起开裂。

经过对锻造轴颈生产工艺的优化,将轴颈加工内孔工序调整到调质工序前,降低了由于轴颈截面尺寸过大引起淬火热应力开裂的风险,也可以提高轴颈部位的淬硬性,从而进一步提升锻造轴颈的可靠性。

参考文献:

[1] 郑玉春, 吴玉程, 刘玉, 等. 40Cr汽车转向节锻造余热淬火工艺研究[J]. 热加工工艺, 2004(3): 47-48.

[2] 郝雯婧. 汽车转向节可靠性台架试验研究[J]. 汽车实用技术,2018(2): 132-135.

[3] 张兵, 刘昌奎, 孔志强, 等. 汽车转向节断裂分析[J]. 失效分析与预防, 2018(6): 389-392+402.

[4] 茅环环. 转向节断裂分析[J]. 汽车维修技师, 2025(18): 122-123.

[5] 赵奇. 40Cr转向节锻造裂纹成因研究[J]. 山西冶金, 2025, 48(4): 244-245+248.

[6] 崔忠圻, 覃耀春. 金属学与热处理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007

[7] 孙盛玉. 热处理裂纹若干问题的初步探讨[J]. 金属热处理, 2009, 34(10): 109-114.

AT&M